

7 0 4 9 2

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ И  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

---

На правах рукописи

ФАХРУТДИНОВА Антонина Николаевна

ВЫСОТНО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА  
НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ  
И ЭФФЕКТЫ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
С ИОНОСФЕРНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

04.00.22 - геофизика

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

МОСКВА - 1992

Работа выполнена в Казанском ордена Ленина и ордена Трудового  
Красного Знамени государственном университете  
им. В.И. Ульянова-Ленина

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор Г.С. Иванов-Холодный

доктор физико-математических наук,  
профессор А.И. Ивановский

доктор физико-математических наук,  
профессор Э.С. Казимировский

Ведущая организация: Институт экспериментальной метеорологии,  
г. Обнинск

Защита диссертации состоится "28" апреля 1992г.  
в 10 часов \_\_\_\_\_ минут на заседании специализированного совета  
Д.002.83.01 в ИЗМИРАН по адресу: 142092, г. Троицк, Московская  
области (проезд автобусом № 531 от станции метро "Теплый стан"  
до остановки "ИЗМИРАН").

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан "27" марта 1992г.

Ученый секретарь специализированного  
совета, кандидат физ.-мат. наук

*Александр* П. Коломийцев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Практическая необходимость глубокого понимания изменений погоды и климата, экологии околоземного пространства, аэрономических и физических процессов ионосферы привела к интенсивным исследованиям динамики средней атмосферы. Обширные координированные исследования были проведены в периоды Международных мероприятий (МТТ, МГСС), программ и проектов (МАР, МАС, GLOBMET, DYANA, STEP и др.). Получили широкое развитие радиофизические методы исследований, среди которых важное место занимает радиометеорный метод.

Метод позволяет исследовать циркуляцию нижней термосферы. Эта область высот, как переходная от мезосферного типа циркуляции к термосферному, обладает сложной структурой динамики. Знания о детальных высотных закономерностях горизонтальных и вертикальных движений и их временной изменчивости крайне важны при развитии моделей общей циркуляции и понимании физики нижней ионосферы, а также при решении ряда прикладных задач, связанных с прогнозом неоднородной структуры нижней ионосферы и распространения радиоволн.

Имеющиеся на сегодняшний день ряды наблюдений зонального и меридионального ветра в нижней термосфере с измерением высот, полученные методом радиолокации метеорных следов, методом частичных отражений с использованием MST, MF- радаров проводятся в основном в западном полушарии. Полученные в последние годы ряды измерений зональной и меридиональной циркуляции в регионе Восточной Европы (Колунгсборн -  $54^{\circ}\text{N}$ ,  $12^{\circ}\text{E}$ ) не обеспечивают высокое разрешение по высоте и регулярные измерения в течение суток. Наблюдения ветра с измерением высот в средних широтах Европейского региона, проводимые в ХИРЭ (г. Харьков -  $50^{\circ}\text{N}$ ,  $36^{\circ}\text{E}$ ), содержат регулярную информацию лишь о зональной циркуляции. Меридиональный поток в нижней термосфере существенен. Однако широтные, долготные, высотные, сезонные вариации его менее изучены по сравнению с зональной циркуляцией. Необходимо учитывать меридиональную циркуляцию и при изучении волновых и турбулентных процессов в целях исследования их анизотропии. К тому же такие динамические процессы, как крупномасштабные вертикальные перемещения, важные наряду с зональной, меридиональной циркуляцией и волновыми движениями при определении термодинамического режима и состава нижней термосферы, могут быть определены радиометеор-

ным методом при измерении горизонтальной неоднородности зональной и меридиональной циркуляции.

Существующие на сегодняшний день экспериментальные данные о вертикальных движениях, полученные с использованием MF и MST-радаров, противоречат модельным представлениям. Анализ точности проведенных измерений дает основание полагать, что погрешности измерений соизмеримы с полученными значениями вертикальных скоростей. Учитывая техническую сложность подобных экспериментов и возможные значительные погрешности измерений, перспективным остается развитие метода, основанного на использовании универсального уравнения неразрывности и экспериментальных данных о дивергенции ветрового поля, полученных в функции высоты по радиометеорологическим наблюдениям с высотомером.

Нижняя термосфера представляет собой область высот, где становятся существенными волновые процессы и их диссипация. Важными остаются вопросы модуляции внутренних гравитационных волн (ВГВ) и приливов синоптическими масштабами при развитии гипотезы проникновения планетарных волн на высоты нижней термосферы за счет механизма модуляции.

Исследования волновых потоков и их сезонных закономерностей, выполненные в ЛГУ с привлечением ветровых радиометеорологических наблюдений без измерения высот, проведенных в ИЭМ (г. Обнинск), опирались на модельные расчеты таких важных характеристик ВГВ, как вертикальные длины волн и их фазовые скорости. Однако экспериментальные данные об этих параметрах крайне важны при расчетах волновых потоков и их высотных профилей, которые существенно влияют на формирование циркуляции, тепловой режим и состав средней атмосферы.

Существующие на сегодняшний день модели циркуляции в области мезопаузы - нижней термосферы не отражают долготной зависимости, и крупномасштабная структура среднезональной глобальной циркуляции требует уточнений; остаются актуальными и исследования долготных эффектов при детальном высотном разрешении.

Значительный прогресс в развитии моделей глобальной циркуляции средней атмосферы, теплового режима и состава средней атмосферы, а также неоднородной структуры ионосферы возможен при наличии длинных, однородных рядов экспериментальных данных, отражающих временные и высотные вариации целого комплекса динамических процессов: зональных, меридиональных, вертикальных перемещений, волновых, турбулентных процессов. Подобная информационная база данных позволяет рассматривать все эти процессы во взаимо-

связи, определить "климат" нижней термосферы, исследовать взаимосвязь различных высотных уровней средней атмосферы и ионосферы, оценить воздействие волновых полей на термодинамические процессы в нижней термосфере, ее турбулизацию и на формирование неоднородной структуры ионосферы.

Хотя глобальные измерения атмосферных параметров легко достигаются спутниковыми системами, однако, действующие спутниковые системы не обеспечивают адекватного разрешения высот в области мезопаузы - нижней термосферы и нуждаются в высотной калибровке, которая может быть осуществлена с использованием метеорных радиолокационных станций, оснащенных высотомерами.

Все вышесказанное подчеркивает актуальность развития экспериментальных исследований высотных изменений динамических процессов, установления высотно-временных структур и создания региональных моделей комплекса динамических процессов нижней термосферы, необходимых при разработке модели глобальной циркуляции и состава верхней атмосферы, адекватных моделей ионосферы и развития прогноза распространения радиоволн.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ кафедры радиофизики, входящими в Координационный план Научного совета АН СССР по комплексной проблеме "Распространение радиоволн" как темы: "Исследование закономерностей общей циркуляции верхней атмосферы", "Изучение свойств нижней ионосферы в части выявления тонкой структуры нейтрального ветра и его взаимодействия с ионосферными явлениями", "Изучение высотной зависимости структуры ветра на высотах 80-100 км радиометеорным методом в целях развития модели средней атмосферы"; исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились также в соответствии с Международными программами и проектами MAP, MAC, WITS, GLORMET и др.

#### Цель работы:

Установить в средне-широтной нижней термосфере на основе экспериментальных исследований высотно-сезонные структуры комплекса динамических процессов - преобладающих, приливных движений зональной и меридиональной циркуляции, крупномасштабных вертикальных перемещений, волновых движений в широком интервале временных масштабов от ВГВ до синоптических вариаций и интенсивности нерегулярных движений; создать в целях их описания региональные эмпирические модели; выявить высотную зависимость эффектов взаимодействия динамических процессов нижней термосферы с явлениями в нижней ионосфере.

Данная цель и задачи потребовали разработки радиофизического метода с использованием радиометеорного радара, его оснащения высокоточным высотомером, создания программно-методического обеспечения и проведения специально организованных длительных циклов однородных наблюдений.

Научная новизна:

1. Впервые по однородным рядам длительных наблюдений с высоким разрешением высот в среднеширотной нижней термосфере в регионе Восточной Европы на единой методической основе определены среднемноголетние нормы, изменчивость и высотно-сезонные структуры комплекса динамических процессов.

2. Впервые выявлены крупномасштабные высотно-сезонные структуры в поле зональной и меридиональной циркуляции с характерными западными ветрами в летний период в интервале 90-110 км с реверсом ветра около 90 км, и в осенне-зимний период в интервале 80-100 км, а также структуры северных ветров летом в интервале 80-95 км и южных ветров в осенне-зимний период в интервале 80-90 км; установлены долготные эффекты в функции высоты, проявляющиеся в долготных вариациях параметров преобладающих и приливных движений вплоть до смены знака зональных и меридиональных ветров, а также в различиях модового состава приливов.

3. Установлены высотно-сезонные закономерности волновых полей от ВГВ до синоптических движений, свидетельствующие о механизме диссипации ВГВ как возможном источнике турбулентности до высот  $\sim 105$  км зимой и 95-98 км летом; впервые по экспериментальным данным с использованием модельных представлений оценен вклад волновых потоков горизонтального импульса в формирование высотных вариаций средней меридиональной и зональной циркуляции, установлена определяющая роль волновых потоков горизонтального импульса при формировании меридиональной циркуляции.

4. Получены высотно-временные закономерности интенсивности нерегулярных движений, для которых характерны внутрисуточные вариации с временными масштабами ВГВ, приливов с вертикальными длинами волн 9-60 км, синоптические, а также годовые и полугодовые вариации с выраженными высотными изменениями; интенсивность нерегулярных движений обнаруживает максимальные значения зимой и рост с высотой во все сезоны, а также в среднем за год в интервале 80-100 км.

5. Впервые по радиометеорным измерениям в интервале высот 85-105 км за трехлетний период с 1986 по 1988 гг. получена вы-

зотно-сезонная структура крупномасштабных вертикальных движений с характерными нисходящими и восходящими движениями в зимний и летний периоды соответственно и нисходящими движениями в отдельные годы летом ниже 90 км.

6. Установлены высотные закономерности взаимосвязи динамических процессов нижней термосферы и эффектов поглощения радиоволн в нижней ионосфере, свидетельствующие о возможном контроле электронной концентрации в области  $Q$  через механизмы переноса  $NO$  зональными, вертикальными, нерегулярными движениями, присутствующими в интервале высот 80-90 км, 85-105 км, 95-105 км соответственно.

Практическая значимость. Полученные экспериментальные данные о климатологии преобладающих, приливных, волновых, нерегулярных движений в функции высоты и разработанные эмпирические региональные модели необходимы при моделировании циркуляции, при развитии адекватных моделей состава и термического режима верхней атмосферы, неоднородной структуры нижней ионосферы и прогноза распространения радиоволн.

Разработанный способ определения координат отражающих областей на метеорных следах внедрен и успешно используется при исследовании пространственно-временных структур падающего метеорного потока в окрестности орбиты Земли. Результаты о преобладающих, волновых, нерегулярных, приливных движениях переданы в Мировой центр хранения данных - МЦД-Б2 и включены в международный обмен, внедрены и использованы в Институте прикладной геофизики, Научно-исследовательском институте физики ЛГУ, Сибирском физико-техническом институте, Институте космических исследований и распространения радиоволн (Дальневосточное отделение), Научно-исследовательском институте дальнего распространения радиоволн, включены в итоговые отчеты результатов научных исследований по Международным проектам и в перечень основных достижений за 1991 г. по Российской Академии наук, вошли в итоговые отчеты лаборатории, внедрены в учебный процесс кафедры радиоастрономии и радиофизики Казанского университета.

#### На защиту выносятся:

I. Установленные по многолетним рядам радиометеорных наблюдений в среднеширотной нижней термосфере высотно-временные закономерности горизонтальных, вертикальных движений, волновых воз-

мущений зональной и меридиональной циркуляции в интервале временных масштабов от ВГВ до синоптических вариаций, включая

1) результаты о высотно-сезонной зависимости долготных эффектов в поле преобладающих и приливных движений зональной и меридиональной циркуляции;

2) результаты о влиянии ВГВ и приливов на циркуляцию нижней термосферы.

2. Модельное описание преобладающих, приливных движений зональной и меридиональной циркуляции, вертикальных перемещений, а также интенсивности нерегулярных движений в зависимости от высоты и месяца года.

3. Геофизические приложения установленных закономерностей зональных, меридиональных, нерегулярных, вертикальных движений для выявления высотных закономерностей их взаимосвязи с такими ионосферными явлениями как неоднородная структура нижней ионосферы и эффекты зимней аномалии поглощения радиоволн.

Достоверность результатов и научных положений обусловлена большим объемом проведенных исследований, на основе которых сделаны главные выводы работы, статистической надежностью измерений сравнением и хорошим согласием результатов измерений с экспериментальными данными и с имеющимися модельными представлениями, тщательным анализом погрешностей измерений.

Личный вклад автора. Автором выбрана тема исследований, поставлены научные задачи, осуществлено научное руководство по вопросам исследований закономерностей циркуляции в нижней термосфере радиометеорным методом, разработано техническое задание на комплекс геофизических параметров и их точности, заданы необходимые точности фазовых измерений, разработаны способы калибровки фазового высотомера, определена азимутальная методика ветровых наблюдений в целях получения устойчивых характеристик и расширения возможностей радиометеорного метода; принималось участие в разработке программ координированных радиометеорных исследований совместно с представителями ХИРЭ, ИЭМ, ИФ АН Кирг. ССР, ИАФ АН Тад.ССР; организованы комплексные радиометеорные измерения в Казани в период 1978-1990 гг., разработаны методики и алгоритмы вычислений угловых координат, высот, параметров геофизических процессов в целях установления их высотных и временных закономерностей; осуществлены анализ, интерпретация и обобщение полученных результатов; заложены основы экспериментальной базы данных для построения климатических норм высотных структур



преобладающих и волновых движений в широком интервале временных масштабов от ВГВ до сезонных вариаций на высотах нижней термосферы; созданы региональные эмпирические модели высотных и сезонных вариаций преобладающих, приливных, нерегулярных, крупномасштабных вертикальных движений; сформулированы научные выводы и положения, которые выносятся на защиту.

Аппробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы докладывались на I,2 Всесоюзном симпозиуме "Взаимодействие космической пыли с атмосферой" (Ашхабад-1974 г.; Фрунзе - 1978 г.); на совещании проблемной рабочей группы Астросовета по исследованию метеоров и секции метеоров МГК (Одесса-1976 г.); на П-У Всесоюзном совещании по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере (Обнинск-1976, 1979, 1982, 1985 гг.); на I и 2 Всесоюзных симпозиумах по результатам исследований средней атмосферы (МАР-Алма-Ата-1983 г., Москва-1986 г.); на Всесоюзной конференции "Метеорные тела в межпланетном пространстве и земной атмосфере" (Суздаль-1984 г.); на I и 2 Международных симпозиумах по программе "GLOBMET" (Душанбе-1985 г.; Казань-1988г.); на 2 Международном семинаре по исследованию слоя  $E_s$ , аэронамии нижней термосферы и неоднородностей ионосферы по проблеме "Планетарные геофизические исследования (КАПГ)" (Венгрия - Шопрон-1985 г.); на 3 Международном семинаре по проблеме "Метеорологические эффекты в ионосфере" (Болгария - София-1988 г.); на Всесоюзном симпозиуме по динамике малых тел солнечной системы (Кадивели-1986 г.); на Международном симпозиуме по проблеме "Неустойчивости и волновые явления в системе ионосфера-термосфера" (WITS - INEITS) (Калуга-1989 г.); на 3 Международной сессии программы WITS (проект WAGS) по проблеме "Волновые возмущения в системе ионосфера-термосфера" (Алма-Ата-1989 г.); на Международном симпозиуме по исследованию средней атмосферы (МАС, Душанбе-1989 г.); на Всесоюзном симпозиуме по проблеме "Геофизические аспекты переноса примесей в верхней атмосфере" (Обнинск-1990 г.); на XVI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (Харьков-1990 г.), а также на научных семинарах и конференциях Казанского университета.

По материалам работы опубликовано более 90 работ. Основные из них приведены в приложении к автореферату.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, содержит 225 страниц основного текста, 108 рисунков, 35 таблиц и список литературы из 382 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований высотно-временной структуры динамических процессов в нижней термосфере, перспективность радиометеорного метода исследований, цель и научная новизна диссертационной работы, ее научная и практическая ценность. Излагается краткое содержание работы; а также формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы по вопросам развития радиометеорного метода исследований динамики в области метеорных высот. Развитие радиометеорного метода основано на совершенствовании радиофизических средств и методики измерений, автоматизации наблюдений, обработки и хранения получаемой информации на магнитных носителях. В этой главе приведены основные технические данные радиолокационных комплексов, разработанных и действующих в КГУ с 1964 года по настоящее время. В целях повышения информативности метода были разработаны фазовые угломерные системы, входящие в качестве составной части в радиолокационный комплекс КГУ-М4, при разработке, изготовлении и эксплуатации которого автор принимала непосредственное участие. При создании комплекса КГУ-М5, также оснащенного высотомером, и с использованием которого проведены наблюдения с 1978 по 1990 годы, автором разработано техническое задание на требуемые точности измеряемых геофизических параметров и способы их достижения; обоснована азимутальная методика наблюдений, позволяющая совместить геофизические и астрономические исследования, повысить статистическую обеспеченность, уменьшить погрешность оценок средних скоростей ветра, расширить круг геофизических задач; разработана методика измерения угловых координат и высот отражающих областей на метеорных следах; а также методика комплексной калибровки фазового интерферометра с контролем точности измерений в реальном масштабе времени и в период наблюдений метеорных потоков.

Калибровка по потоковым метеорам заключается в измерении радианта наблюдаемых метеорных потоков по разработанной методике, координаты радианта которых известны из литературных источников. Полученное совпадение вычисленных координат радиантов потоков со значениями, приведенными в литературе, свидетельствует о достоверности проводимых измерений угловых координат и соответственно высот отражающих областей на метеорных следах.

Основные технические характеристики автоматизированного радиолокационного комплекса, оснащенного фазовым высотомером:

местоположение комплекса - ( $56^{\circ}N$ ,  $49^{\circ}E$ ); рабочая частота 32 МГц; длительность импульса 100 мкс; частота зондирования 400 Гц; импульсная мощность передающего устройства  $\sim 150$  кВт; чувствительность радиоприемных устройств при отношении сигнал/шум, равном 2, 0.7 мкВ; полоса пропускания 25 кГц; передающая антенна сдвоенная типа "волновой канал"; приемные антенны - пять трех-элементных антенн "волновой канал"; все антенны автоматически устанавливаются в четырех взаимноортогональных азимутах в соответствии с программой наблюдений; базы фазового интерферометра, равные  $4\lambda$ ,  $4.5\lambda$ , ориентированы по странам света; управление экспериментом автоматическое с помощью мини-ЭВМ; разрешающая способность фазового угломера в максимуме диаграммы направленности по азимутальному и зенитному углу 20 угловых минут, высоты  $\sim 1$  км, радиальной скорости  $\sim 3$  мс $^{-1}$ .

Показано, что косвенные методы оценок высот с использованием зависимостей от высоты скоростей метеорных частиц и коэффициентов амбиполярной диффузии метеорных ионизаций неэффективны при исследовании высотной структуры геофизических процессов, особенно малых временных масштабов.

Проведенный анализ статистической обеспеченности радиометеорных наблюдений по азимутальной методике указывает на возможность получать непрерывные временные ряды ветровых измерений.

Приведены основные положения разработанных алгоритмов измерений следующих параметров: индивидуальных и среднечасовых значений скоростей ветра в зависимости от высоты; угловых координат, высот отражающих областей на метеорных следах с контролем точности измерений для каждого индивидуального метеорного радиоэхо, коэффициента амбиполярной диффузии метеорных ионизаций, скоростей метеорных частиц и среднеквадратических погрешностей перечисленных параметров; представлена структура комплексной обработки измерений и создания банка получаемых экспериментальных данных на магнитных носителях, реализуемая на мини-ЭВМ.

Во второй главе приводятся основные положения азимутальной методики наблюдений с ориентацией измерительных антенн в направлениях  $N$ ,  $S$ ,  $E$ ,  $W$ ; изложен способ гармонического анализа, проводимого с привлечением метода наименьших квадратов, что позволяет вычислять погрешности определяемых параметров; представлены результаты исследований временных и высотных закономерностей преобладающих и приливных движений, полученных радиометеорным методом в период 1978-1989 гг.

Сравнение результатов координированных наблюдений, проведенных в 1980-1985 гг. в Казани, Обнинске, Харькове, показало, что поведение зонального и меридионального ветра во всех пунктах в общих чертах соответствует среднемноголетнему: в зимний период доминируют западные потоки, которые во время весенней перестройки циркуляции меняются на восточные; для меридионального ветра характерна смена слабых южных потоков в зимний период на северные в весенний период; в летний период для зональной циркуляции характерны западные ветры, для меридиональной - северные. По результатам наблюдений установлено подобие синоптических, сезонных вариаций параметров преобладающих и приливных движений и крупномасштабность таких геофизических явлений как зимняя аномалия циркуляции и весенняя перестройка. Характер возмущений с синоптическими периодами различен в поле зональной и меридиональной циркуляции и в поле преобладающих и приливных движений; обнаружено выраженное подобие синоптических возмущений амплитуд зонального и меридионального компонентов полусуточного прилива, установлены заметные различия сезонных зависимостей параметров полусуточного прилива, наблюдаемых в средних широтах Северного полушария и в высоких широтах Северного и Южного полушарий. По результатам наблюдений в Казани, Обнинске, Харькове и с привлечением результатов измерений, выполненных немецкими исследователями в Килунгсборне, определены пространственные масштабы синоптических возмущений в поле преобладающей циркуляции, равные  $\sim 4500$  км зимой,  $\sim 1600$  км - весной. Масштабы синоптических возмущений полусуточного прилива в зимний период и период интенсивной весенней перестройки в марте месяце меньше по сравнению с масштабами возмущений для преобладающего ветра, в апреле же соизмеримы.

По длинному ряду измерений, проведенных в Казани в 1978-1989 гг. и отнесенных к средней высоте метеорной зоны, исследована и климатическая изменчивость ветровых параметров зональной и меридиональной циркуляции, определены среднемноголетние нормы и дисперсия ветровых параметров; величины среднеквадратического разброса ветровых параметров, за исключением преобладающего меридионального ветра в зимний, весенний, осенний периоды, в основном, не превышают  $\sim 30\%$ , что указывает на климатическую устойчивость циркуляции в области метеорных высот. Выявленная сезонная изменчивость ветровых параметров на метеорных высотах формируется долгопериодными вариациями, определяющими среди которых являются годовые, полугодовые периодичности. Измеренные амплитуды

годовой, полугодовой периодичности для преобладающего зонального ветра равны соответственно  $7.5 \text{ мс}^{-1}$ ,  $9.5 \text{ мс}^{-1}$ ; для преобладающего меридионального ветра  $6 \text{ мс}^{-1}$ ,  $1.5 \text{ мс}^{-1}$ ; для амплитуд зонального и меридионального компонентов полусуточного прилива  $4.9 \text{ мс}^{-1}$ ,  $2.2 \text{ мс}^{-1}$ .

С привлечением полученного в период 1986-1989 гг. банка данных и разработанных методов анализа высотных зависимостей установлены устойчивые от года к году высотно-сезонные структуры в поле преобладающей зональной циркуляции с характерными западными ветрами в осенне-зимний период в интервале высот 80-110 км и в летний период на высотах выше 90 км. Восточные ветры, характерные для периода весенней перестройки, наблюдаются во всем интервале высот, а на высотах ниже 90 км присутствуют и в летний период и указывают на проникновение страто-мезосферного антициклона в нижнюю термосферу. Средний за четырехлетний период зональный поток остается западным во всей метеорной зоне, обнаруживая небольшие высотные изменения в интервале высот 80-92 км; меридиональный поток - северный при незначительных высотных изменениях около значения  $-3 \text{ мс}^{-1}$ .

Получено подобие высотно-сезонных структур в поле полусуточного прилива для зонального и меридионального компонентов; установлены различия высотно-сезонных структур в поле суточного и полусуточного прилива, а также в поле суточного прилива для зонального и меридионального компонентов.

Выявлены долгопериодные вариации в поле преобладающего и приливного ветра как для зональной, так и меридиональной циркуляции с выраженными высотными различиями в поведении амплитуд и фаз долгопериодных вариаций с периодами  $T_k = 2$  года, 1 год, 0.5 года, 4 месяца. Долгопериодные вариации более выражены в поле зональной циркуляции для преобладающих и приливных движений, а также в поле полусуточного прилива по сравнению с суточным. Высотные градиенты фаз годовых вариаций зональной циркуляции в интервале высот 80-92 км и меридиональной циркуляции в интервале 80-110 км близки к нулю; градиенты фаз годовых вариаций зональной циркуляции в интервале 92-110 км равны  $\sim 7 \text{ сут. км}^{-1}$ , полугодовых вариаций зональной и меридиональной циркуляции в интервале 80-110 км равны  $2 \text{ сут. км}^{-1}$ .

Проведенное сравнение параметров долгопериодных вариаций преобладающих и приливных движений, полученных в разные годы в период 1978-1989 гг. в Казани и в других регионах Северного и Южного полушарий, свидетельствует об устойчивом и глобальном ха-

рактуре годовых и полугодовых вариаций. Установлено, что высотные вариации амплитуд и фаз годовых и полугодовых вариаций могут быть описаны линейными зависимостями в интервалах высот 80-92 км, 92-110 км; получены и представлены в табличном виде значения коэффициентов линейных регрессий.

С учетом установленных закономерностей сезонных, межгодовых высотных вариаций характеристик зональной и меридиональной циркуляции предложена эмпирическая модель высотных вариаций параметров преобладающего и приливного ветра для каждого месяца года в виде:

$$P_k(i, h) = \sum_{n=0}^2 A_{kn}(h) \cos \frac{2\pi}{12} n \left[ i - t_{kn}(h) \right],$$

где  $A_{kn}(h)$ ,  $t_{kn}(h)$  - соответственно амплитуда и фаза годовых ( $n = 1$ ), полугодовых ( $n = 2$ ) вариаций в зависимости от высоты  $h$ ,  $i$  - текущий месяц года, индекс  $k = 0, 1, 2$  соответствует преобладающим, суточным и полусуточным приливным движениям.

Предложенная эмпирическая модель удовлетворительно описывает экспериментальные зависимости ветровых параметров.

Представлены результаты исследований долготных эффектов в зависимости от высоты в интервале 80-110 км в поведении зональной и меридиональной циркуляции во все сезоны года на основе сравнения результатов ветровых измерений, проведенных в 1987 г. радиометеорным методом в Казани и методом частичных отражений в Саскатуне, расположенных в широтном поясе ( $52-56^\circ N$ ) и значительно разнесенных по долготе ( $49^\circ E - 107^\circ W$ ).

На основе проведенного сравнения результатов измерений и сопоставления их с эмпирической среднезональной моделью глобальной циркуляции для указанных широт установлен глобальный характер структуры западных ветров в осенне-зимний период в интервале 80-100 км и в летний период в интервале 90-110 км с реверсом ветра около 90 км, а также структуры среднегодовых западных и северных ветров соответственно в интервалах высот 80-110 км и 85-110 км; выявлена повторяемость при значительном долготном разное и структуры северных ветров летом в интервале 80-95 км.

Установленная экспериментально незональность циркуляции свидетельствует о смене направления зональных и меридиональных ветров во все сезоны в том или ином интервале высот нижней тер-

иосферы. Долготные эффекты в поле приливных движений более выражены в поведении фаз и указывают на различия модового состава суточного и полусуточного прилива, наиболее выраженные в осенне-зимний период.

В третьей главе изложено состояние проблемы, связанной с исследованием ВГВ различными радиофизическими средствами; подчеркнута актуальность мониторинга волновых возмущений в широком интервале временных масштабов.

Поскольку суперпозиция волн, присутствующих в нижней термосфере, не может быть представлена аналитически из-за сложности учета всех эффектов линейного и нелинейного взаимодействия движений различных масштабов, нами был развит статистический подход, позволяющий исследовать интенсивность возмущений волнового типа (ВВ) в том или ином участке спектра методом, основанным на способе демодуляции и использовании симметричных фильтров нулевых частот по типу кривой Гаусса с переменной шириной окна усреднения. Метод позволяет определить длительность выделенных волновых цугов. Разработанный алгоритм обработки при исследовании ВВ включает проведение предварительных приемов высокочастотной и низкочастотной фильтрации в целях уменьшения влияния турбулентного шума и приливных движений. Метод позволяет также получать значения амплитуд  $a(\omega_k, t, h, x, y)$ , фаз  $\varphi(\omega_k, t, h, x, y)$  в зависимости от частоты  $\omega_k$  (периода  $T_k$ ) ВВ, времени  $t$ , высоты  $h$  и горизонтальных координат  $x, y$  и, таким образом, выделять индивидуальные волны. Получаемые сведения о фазе играют важную роль при выделении волн, т.к. основным критерием, наряду с превышением амплитуды волны над уровнем шума, являются пространственные вариации фазы по линейному закону, что позволяет определить вертикальные и горизонтальные длины выделенных волн и направление их распространения. На последнем этапе обработки проводится вычисление значений спектральной плотности и ее погрешностей, усредненных за определенный интервал времени.

Для повышения разрешающей способности радиометеорного метода при выделении ВГВ в интервале временных масштабов менее 0.5 ч предложено использовать измерения скоростей ветра в период интенсивных метеорных потоков. Впервые по радиометеорным измерениям выделены волновые пути длительностью около 2-х часов на частотах, соответствующих минимальным временным масштабам ВГВ в нижней термосфере, равным  $\sim 4$  мин.

По измерениям обнаружена во все сезоны амплитудная и фазовая модуляция ВВ с периодами приливных и синоптических движений, что приводит к формированию цугов волн. Факт модуляции ВВ установлен нами впервые по радиометеорным измерениям летом 1978 г. и нашел многократное подтверждение в последующих экспериментах. Установленный факт модуляции амплитуд ВГВ синоптическими масштабами важен для решения проблемы переноса энергии и импульса планетарных волн из тропосферы на высоты нижней термосферы. Несмотря на то, что стратосфера при восточных ветрах "препятствует" проникновению планетарных волн в верхнюю атмосферу, вариации ветровых параметров с синоптическими масштабами присутствуют на высотах нижней термосферы во все сезоны, подтверждая возможный механизм переноса энергии и импульса за счет ВГВ, интенсивность которых модулирована синоптическими масштабами.

Проведенные исследования высотной структуры амплитудных, фазовых, спектральных характеристик ВВ с временными масштабами 40 мин - 7 суток, полученных по радиометеорным измерениям с разрешением высот в период 1986-1987 гг., подтвердили установленные в среднем для метеорной зоны закономерности о внутрисуточных, межсуточных, сезонных вариациях ВВ. Установлена трансформация полученных спектров  $J(T_k, h, t)$  с изменением временного масштаба ВВ, высоты и сезона наблюдения. В сезонных вариациях  $J(T_k, h, t)$  замечена тенденция, имеющая прогностическое значение, - сохранение высотной структуры при переходе от осени к зиме, от весны к лету. Характерной закономерностью высотных вариаций амплитуд ВВ с  $40 \text{ мин} \leq T_k \leq 24 \text{ ч}$  является падение их в интервале высот  $80 \text{ км} < h \leq 95 \text{ км}$ , особенно выраженное в летний период, в связи с чем высотные вариации среднесезонных значений амплитуд ВВ с  $T_k \leq 24 \text{ ч}$  в интервале 80-110 км могут быть описаны квадратичными зависимостями.

Установлены эффекты анизотропии интенсивности ВВ с масштабами от ВГВ до синоптических масштабов на высотах 80-110 км. Полученные высотные профили амплитуд ВВ с временными масштабами  $40 \text{ мин} < T_k < 7 \text{ суток}$  обнаруживают незначительные межгодовые вариации. Пределы изменений амплитуд ВВ в зависимости от временного масштаба, высоты, сезона равны 10-40  $\text{мс}^{-1}$ .

По экспериментальным данным за период 1986-1987 гг. выделено 830 волн в интервале временных масштабов 1-24 ч с применением спектрально-фильтрового анализа, критериев линейных вариаций фаз в пространстве и превышения мощности спектра сигнала над шумом с вероятностью не ниже 0.75; 37% выделенных волн имеют отрицатель-



тые высотные градиенты фаз и свидетельствуют о распространении волновых потоков вниз. Полученные оценки вертикальных ( $\lambda_z$ , км), горизонтальных ( $\lambda_x$ , км) длин волн в интервале высот 36-99 км имеют следующее распределение:  $N(\lambda_z \leq 10) = 58\%$ ,  $N(10 < \lambda_z \leq 30) = 35\%$ ,  $N(\lambda_x \simeq 200) = 40\%$ ,  $N(200 < \lambda_x \leq 500) = 42\%$ . С использованием измеренных параметров ветра и ВВ в функции высоты и сезона и разработанного метода с использованием модельных представлений, предложенных Гавриловым Н.М. (ЛГУ), получены средние за сезон высотные профили волновых потоков энергии, тепла, импульса, массы. Вид высотных профилей волновых потоков различен для временных масштабов 1-6 ч, 6-24 ч, а также меняется в зависимости от сезона. Характерной тенденцией представленных потоков во все сезоны является их знакопеременность в интервале высот 90-100 км. Подобное поведение, по-видимому, связано с наличием на этих высотах эффектов отражения волн и их разрушения под действием взаимодействия как с фоновым потоком, так и с другими волнами, приводящих в конечном итоге к стохастизации волновых полей.

Установлено, что долгопериодные возмущения основной массы волновых потоков распространяются снизу вверх и служат подтверждением того, что их природа определяется тропостратосферными процессами. Сравнение долгопериодных вариаций параметров преобладающего ветра и приливных движений показало, что межгодовые, сезонные вариации преобладающей циркуляции, суточного прилива и волновых потоков взаимообусловлены. Получена высотно-сезонная структура величин скоростей зональной и меридиональной циркуляции, порождаемых волновыми потоками горизонтального импульса. Количественные оценки вклада в зональную и меридиональную скорости за счет волновых потоков горизонтального импульса в среднем для интервала высот 89-101 км оказались равными  $|\Delta U_0| \leq 0.15 |U_0|$ ,  $|\Delta V_0| = (0.5 \div 1) |V_0|$ ; их вклад в зависимости от высоты и сезона составляет 32-100%, 10-45% годовых и полугодовых вариаций меридиональной и зональной скорости ветра соответственно; полученные оценки подтверждают определяющую роль диссипирующих ВВ при формировании меридиональной циркуляции и ее внутригодовых вариаций.

В четвертой главе приводятся результаты исследований турбулентности в области метеорных высот. Изложены способы и результаты определения параметров турбулентности, выполненные с привлечением федингующих метеорных радиозо, получено эксперимен-

тальное подтверждение существования в нижней термосфере развитой локально-изотропной турбулентности, приведены оценки скорости диссипации турбулентной энергии в весенне-летний и зимний периоды соответственно  $\varepsilon \sim 4500 \text{ см}^2\text{с}^{-3}$ ,  $\sim 15000 \text{ см}^2\text{с}^{-3}$  в интервале пространственных (15-25 м) и временных (6-16 с) масштабов. Представлен способ определения интенсивности турбулентных движений в интервале пространственных масштабов  $z = 1-5 \text{ км}$  в соответствии с использованными длительностями радиоэхо  $1 \text{ с} < \tau < 30 \text{ с}$ , подтвержденный авторским свидетельством. В основу метода положена установленная взаимосвязь частотной спектральной плотности флуктуаций амплитуд радиоэхо в стадии развитого фединга и турбулентных флуктуаций скоростей ветра на метеорных высотах. Разработанный способ измерения величин интенсивности турбулентных движений более прост при технической реализации по сравнению с методом разнесенного приема, применяемого ранее.

Изложены результаты исследований высотно-временной структуры интенсивности нерегулярных движений, которые трактуются как суперпозиция широкого спектра волновых и турбулентных движений, присутствующих в нижней термосфере. Вследствие анизотропии волновых и турбулентных возмущений циркуляции в нижней термосфере и малости вертикальных движений по сравнению с горизонтальными величина интенсивности нерегулярных движений на единицу массы вычисляется из выражения  $b(h) = (\sigma_u^2(h) + \sigma_v^2(h))/\rho$ , где  $\sigma_u(h)$ ,  $\sigma_v(h)$  - среднеквадратические отклонения зонального  $u$ , меридионального  $v$  компонентов скорости ветра за интервал измерения 1 час на высоте  $h$ .

Внутрисуточные вариации интенсивности нерегулярных движений определяются в основном ВГВ и коротковолновыми модами приливов с вертикальными длинами волн  $\lambda_z = 9-60 \text{ км}$ , интенсивность которых вследствие эффектов модуляции контролируется более крупномасштабными процессами, определяющими синоптические, сезонные межгодовые вариации.

Для описания сезонных вариаций интенсивности нерегулярных движений предложена эмпирическая модель, представляющая внутригодовые изменения в виде суперпозиции годовых, полугодовых, четырехмесячных вариаций, параметры которых в функции высоты определены по 3-х летнему циклу измерений. Эмпирическая модель удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

Учитывая полученные экспериментально факты о достаточных динамических условиях для формирования областей неустойчивости за счет высотных градиентов фоновой циркуляции и распространяю-

щихся в нижней термосфере коротковолновых мод ВГВ и приливов, а также исходя из гипотезы турбулизации нижней термосферы вследствие процессов нелинейного разрушения волновых движений, можно полагать, что полученные высотно-временные закономерности интенсивности нерегулярных движений качественно отражают высотно-временные вариации интенсивности турбулентности. По экспериментальным данным за период 1986-1988 гг. для интенсивности нерегулярных движений получено, что годовые вариации обнаруживают минимум в интервале высот 85-100 км, где преобладают полугодовые вариации с максимумом в зимний и летний периоды во всем исследуемом интервале высот (80-110) км; выше 100 км интенсивности полугодовых и годовых вариаций соизмеримы. Максимум интенсивности нерегулярных движений наблюдается в зимний период; для зимнего периода характерны и наиболее выраженные внутрисуточные и высотные вариации. Установлено, что интенсивность нерегулярных движений обнаруживает рост с высотой во все сезоны и достигает максимальных значений в интервале высот 98-104 км.

В пятой главе изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований вертикальных движений. Экспериментальные оценки на сегодняшний день довольно противоречивы и меняются от долей сантиметра до нескольких метров. Имеющиеся расхождения, на наш взгляд, связаны с несовершенством существующих моделей циркуляции, обусловлены различием временных масштабов рассматриваемых вертикальных движений, широтными, долготными, межгодовыми различиями, а также методическими погрешностями измерений. Распространенным методом расчета вертикальных движений в метеорологии является метод, основанный на использовании универсального уравнения неразрывности и сведений о дивергенции ветрового поля. Данный метод применительно к радиометеорным измерениям разработан и применен в ИФ АН Кирг.ССР. Метод получил дальнейшее развитие в Казанском университете с использованием результатов азимутальных ветровых измерений, проводимых на радиолокационном комплексе, оснащенном высотометром. Для определения вертикальной скорости используется выражение  $w(h, t) = \int_0^{\infty} Q(x, t) \cdot \exp\left(-\frac{x-h}{\gamma H}\right) dx$ , где  $Q(x, t)$  - горизонтальная дивергенция в функции высоты и времени,  $H$  - высота однородной атмосферы,  $\gamma = C_p / C_v = 1.4$ .

С использованием сформированного банка данных о зональных и меридиональных компонентах ветра в 4-х областях метеорной зоны, разнесенных по горизонтали на  $\sim 400$  км, в функции высоты и времени в период 1986-1988 гг. получены высотно-временные varia-

ции горизонтальной неоднородности зональных и меридиональных преобладающих и приливных движений. Полученные результаты подчеркивают необходимость отфильтровывать приливные движения, а также проводить осреднение в пределах месяца для исключения влияния приливных и синоптических возмущений при получении оценок крупномасштабных вертикальных перемещений.

При наблюдениях с измерением высот метод свободен от методических погрешностей, обусловленных смещением средних высот в разных азимутах наблюдений. Проведенные методические исследования показали, что устойчивость оценок вертикальной скорости повышается в случаях, когда отсутствие измерений внутри суток составляет не более 20% и проводится учет высотного градиента дивергенции ветрового поля, вклад которого в значения вертикальной скорости в некоторые месяцы может достигать 60-90%.

С привлечением рядов измерений, выполненных в Казани в 1986-1988 гг., проведено исследование сезонных и межгодовых вариаций вертикальных перемещений. Анализ межгодовых вариаций показал наличие долгопериодного тренда с периодом более 3-х лет. Проведенное сравнение сезонных вариаций среднемесячных значений  $w$ ,  $w'$ , полученных в Казани и Фрунзе в области метеорных высот, среднемесячных значений температуры  $T$ , определенных по ракетным измерениям на ст. Волгоград, показало выраженную временную связь смены меридионального, вертикального переноса и вариаций температуры. Подобная связь может быть обусловлена существованием в верхней мезосфере-нижней термосфере крупномасштабных меридиональных ячеек циркуляции, осуществляющих обмен теплом и количеством движения.

Впервые по радиометеорным измерениям в интервале высот 85-105 км получена высотно-сезонная структура крупномасштабных вертикальных перемещений за 3-х летний период. В холодное полугодие во всей области высот установлено преобладание нисходящих движений, а в теплое полугодие - восходящих движений, нисходящие движения в 1987, 1988 гг. присутствуют и в летний период на высотах 80-89 км; обнаружены локальные структуры вертикальных перемещений со сменой восходящих и нисходящих движений в некотором интервале высот; замечена тенденция роста вертикальных перемещений с высотой; средние для интервала высот 85-105 км значения  $w$  равны  $\sim 6 \text{ смс}^{-1}$ ,  $- 4 \text{ смс}^{-1}$  соответственно в летний и зимний периоды, на высоте 105 км значения  $w \approx \pm (10 \pm 2) \text{ см с}^{-1}$ .

На основе установленных экспериментально закономерностей.

вертикальных перемещений разработана эмпирическая модель, удовлетворительно описывающая экспериментальные данные. Модель представляет высотные профили  $w(h)$  в линейном приближении

$w(h, t) = w_0(t) + w_1(t)h$ . Установлено, что временные изменения  $w_0(t)$  и  $w_1(t)$  обнаруживают вариации с периодами 1 год, 0.5 года, 4 мес. Окончательное выражение для вертикальной скорости на высоте  $h$  за  $t$ -ый месяц года записывается в виде

$$w(h, t) = \sum_{n=0}^3 w_{0n} \cos \frac{2\pi}{12} n(t - t_{w_{0n}}) + \sum_{n=0}^3 w_{1n} \cos \frac{2\pi}{12} n(t - t_{w_{1n}})h,$$

где  $n = 0, 1, 2, 3$ ,  $w_{0n}, w_{1n}, t_{w_{0n}}, t_{w_{1n}}$  представляют собой соответственно амплитуды и фазы годовых, полугодовых, 4-х месячных вариаций, полученных по экспериментальным данным и заданных в виде таблицы.

Полученные нами значения  $w$  по порядку величины совпадают со значениями вертикальных скоростей, следующими из среднезональной эмпирической модели, развитой Портнягиным Д.И., Соловьевой Т.В. с привлечением уравнения неразрывности и экспериментальных данных о меридиональном ветре. Обнаруженные различия в знаке могут быть следствием незональности.

Шестая глава посвящена исследованию взаимосвязи динамических процессов нижней термосферы с метеорологическими явлениями в тропо-стратосфере и характеристиками нижней ионосферы; в качестве основного механизма, осуществляющего взаимосвязь различных атмосферных слоев и метеорологический контроль нижней ионосферы, отмечены волновые процессы с масштабами ВГВ, приливов, планетарных волн.

Полученные с привлечением длинных рядов ветровых радиометрических измерений, проведенных зимой и летом 1984 г., сведения о взаимосвязи термодинамического состояния средней атмосферы свидетельствуют, что термодинамические процессы с временными масштабами 2-8 суток развиваются на высотах тропосферы, стратосферы, нижней термосферы, при этом обнаружено, что фазовый сдвиг между синоптическими процессами в поле преобладающего и приливного ветра по отношению к вариациям температуры в тропосфере зимой меньше, чем летом.

Проведено сопоставление климатических закономерностей метеорологических полей на высотах тропо-стратосферы и динамических процессов нижней термосферы с привлечением экспериментальных ре-

зультатов о циркуляции в тропо-стратосфере за период 1977-1986 гг., а также ветровых радиометеорных данных. Сравнение циркуляционных процессов в метеорной зоне и тропо-стратосфере показало, что сезонные закономерности циркуляционных процессов аналогичны: наибольшая изменчивость наблюдается в зимний период по сравнению с летним; замечена 2-х годовая цикличность энергетических параметров циркуляции в стратосфере и нижней термосфере, подтверждающая положительную связь динамических структур в области стратосферы-нижней термосферы; сезонные вариации интенсивности нерегулярных движений в нижней термосфере соответствуют сезонному ходу интенсивности волновых движений в стратосфере. Установленная по координированным радиометеорным измерениям в области средних широт Восточной Европы крупномасштабность внутрисезонных и сезонных закономерностей динамических процессов в нижней термосфере находится в соответствии с определяющей ролью длинных волн при формировании пространственных вариаций термодинамических полей в стратосфере и условий проникновения энергонесущих ВВ снизу. Это в конечном итоге приводит к контролю межгодовых, сезонных, внутрисезонных структур циркуляции в нижней термосфере длинноволновыми процессами, источник которых находится в тропосфере.

Отмечено, что привлечение экспериментальных данных о нерегулярной природе нейтрального ветра дает возможность определить структуру и оценить масштабы неоднородностей электронной концентрации нижней ионосферы и, в свою очередь, уточнить параметры радиоволн, распространяющихся в турбулентной нижней ионосфере, в частности, величину уширения частотного спектра, поляризационные характеристики и помехоустойчивость радиосвязи.

В плане изучения метеорологического контроля нижней ионосферы термодинамическими процессами в нижней термосфере проведено исследование корреляционных зависимостей временной изменчивости ионосферных и термодинамических характеристик в 1986-1988 гг.: параметра  $f_{min}$ , характеризующего поглощение радиоволн в области  $D$  (по измерениям на ионосферной станции Москва-Красная Пахра), температуры  $T$  (по ракетным измерениям в Волгограде), скорости вертикальных  $w(h,t)$ , зональных  $u(h,t)$ , меридиональных  $v(h,t)$  и интенсивности нерегулярных движений  $b(h,t)$  (по радиометеорным измерениям в Казани). Исследование взаимосвязи термодинамических процессов с ионосферными явлениями проводится с привлечением результатов измерений, проведенных в пунктах, пространственный разнос которых не превышает радиуса корреляции.

ляции крупномасштабных термодинамических структур в мезосферной термосфере.

Полученные корреляционные зависимости свидетельствуют о повышенных значениях  $f_{min}$  в периоды зимних увеличений температуры и нисходящих вертикальных перемещений, а также обнаруживают тенденцию увеличения корреляции с ростом высоты и значений  $w$ ; для межсуточных вариаций характерно запаздывание максимальных значений  $f_{min}$  по отношению к  $w$  на  $\sim 2$  суток. Зияявлена выраженная высотная зависимость взаимосвязи сезонных вариаций зональной циркуляции и параметра  $f_{min}$ , показывающая значимую положительную корреляцию  $\rho(u, f_{min})$  в интервале высот (80-92) км, ее отсутствие в интервале (92-110) км; получена также значимая положительная корреляция  $\rho(v, f_{min})$  в интервале высот (85-110) км, что соответствует росту  $f_{min}$  в периоды южных ветров.

Получено соответствие повышенных значений  $f_{min}$  и интенсивности нерегулярных движений в зимний полдень по отношению к летнему, а также установлена положительная корреляция сезонных вариаций поглощения в нижней ионосфере и интенсивности нерегулярных движений, присутствующих на высотах (95-110) км.

В настоящее время считается общепризнанным, что основным фактором, ответственным за зимнюю аномалию поглощения коротких и средних радиоволн, является повышение концентрации  $NO$  в области  $D$ . В этой связи остается важным вопрос о транспорте молекул  $NO$  из областей его повышенных концентраций в область  $D$ . Возможен перенос  $NO$  сверху вниз и из высоких широт в средние. Перенос  $NO$  снизу на сегодняшний день считается неэффективным. Установленные нами корреляционные зависимости указывают на возможность переноса  $NO$  зимой из полярных областей циклоническим циркумполярным вихрем в интервале высот (80-92) км. Непосредственный же меридиональный перенос в интервале высот (80-110) км исключается, вследствие преобладания в зимний период в этом интервале высот южных ветров. По-видимому, влияние меридиональной циркуляции реализуется через поля вертикальных движений, формируемых неоднородной горизонтальной структурой зонального и меридионального ветра.

Поскольку зональная циркуляция, вертикальные движения и интенсивность нерегулярных движений обнаруживают выраженное сезонное изменение с максимумом годовых гармоник зимой и полугодовых - зимой и летом, очевидно, упомянутые динамические процессы в интервалах высот установленной максимальной корреляции с эффектами

поглощения и вносят определяющий вклад в годовые и полугодовые вариации поглощения радиоволн в нижней ионосфере через механизм переноса  $NO$  и температурный фактор.

Оценки времени переноса  $NO$  сверху вниз под действием турбулентной диффузии при максимальных, известных на сегодняшний день экспериментальных значениях  $K_T$  для нижней термосферы, равных  $2 \times 10^3 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ , соизмеримы с временем, необходимым для переноса  $NO$  под действием вертикальных движений, равным  $\sim 2$  суткам. Следовательно, механизмы переноса  $NO$  как вертикальными движениями, так и турбулентной диффузией при значениях  $K_T$ , приведенных выше, объясняют наблюдаемое в периоды зимней аномалии значительное повышение поглощения в течение нескольких дней.

Проведенные исследования позволили установить контроль со стороны динамических процессов таких проявлений неоднородной структуры нижней ионосферы как  $E_s$  образования и аномальные высотные профили электронной концентрации.

Заключение. В результате многолетних радиометеорных наблюдений, их анализа и теоретического обобщения решена актуальная и практически важная проблема - установлены в среднеширотной нижней термосфере высотно-сезонные структуры горизонтальных, вертикальных ветров, волновых возмущений с масштабами ВГВ, приливов, синоптических вариаций и сезонных изменений; выявлены общие закономерности, свидетельствующие о глобальном характере основных структур циркуляции и определена степень их незональности; получены высотные зависимости взаимосвязи динамических процессов с ионосферными явлениями. Установленные закономерности и их модельное описание необходимы для адекватного моделирования глобальной циркуляции, разработки моделей состава, термического режима верхней атмосферы, неоднородной структуры нижней ионосферы и прогноза распространения радиоволн.

Основные результаты работы.

I. Разработан радиофизический метод исследований высотной структуры динамики нижней термосферы с использованием технических средств радиолокации метеорных следов и азимутальной методики наблюдений, проводимых в автоматическом режиме; разработана и реализована методика комплексной обработки ветровой информации, включая методику измерения угловых координат, высот отражающих областей и способ калибровки фазового высотомера; достигнута точность измерений угловых координат и высот соответственно  $\pm 0.3^\circ$ ,  $\pm 1$  км; получена новая информационная база данных о параметрах динамических процессов в интервале высот 80-110 км на основе многолетних наблюдений в период 1978-1989 гг. (из них в период 1986-



1989 гг. с измерением высот); информационная база данных включает ~ 17 600 среднечасовых высотных профилей зонального и меридионального ветра.

2. По однородным рядам радиометеорных наблюдений с измерением высот в средних широтах Восточной Европы ( $56^{\circ}\text{N}$ ,  $49^{\circ}\text{E}$ ) определены высотно-сезонные структуры, среднемноголетние нормы, межгодовая изменчивость параметров преобладающих, приливных движений зональной и меридиональной циркуляции; подтверждена крупномасштабность таких циркуляционных процессов как зимняя аномалия, межсезонные перестройки и синоптические возмущения циркуляции с характерными масштабами корреляции зимой и весной соответственно ~ 4500 км, ~ 1600 км; определены высотные закономерности внутритроновых вариаций преобладающих и приливных движений с характерными годовыми и полугодовыми периодичностями; установлен глобальный характер среднегодовых западных и северных ветров, присутствия зимнего страто-мезосферного циклона и летнего антициклона, а также перехода от мезосферного типа циркуляции к термосферному в поле зональной циркуляции соответственно в интервалах высот 80-110 км, 85-110 км, 80-100 км, 80-90 км, ~ 95 км; выявлена высотная и сезонная зависимость долготных вариаций: долготные эффекты в поле зональной и меридиональной циркуляции проявляются во все сезоны в вариациях преобладающих движений вплоть до смены их направления; в поле приливного ветра обнаружены различия значений амплитуд, фаз и их высотных градиентов, свидетельствующие о долготных вариациях модового состава.

3. Разработан спектрально-фильтровой метод исследований возмущений волнового типа в широком интервале временных масштабов, позволяющий исследовать динамику ВВ; установлена модуляция волновых полей малых временных масштабов более долгопериодными процессами, вызывающая формирование цугов волн; определена для зональной и меридиональной циркуляции высотно-сезонная структура интенсивности волновых полей в интервале временных масштабов 1 час - 7 суток, свидетельствующая о наличии анизотропии в некотором интервале высот нижней термосферы, а также о диссипации ВГВ, проявляющейся на ~ 95 км во все сезоны; получено следующее распределение вертикальных  $\Lambda_z$  (км) и горизонтальных  $\Lambda_x$  (км) длин выделенных ВГВ:  $N(\Lambda_z \leq 10) = 58\%$ ,  $N(10 < \Lambda_z \leq 30) = 35\%$ ,  $N(\Lambda_x \leq 200) = 40\%$ ,  $N(200 < \Lambda_x \leq 500) = 42\%$ ; 37% выделенных волн обнаруживает распространение энергии вниз; впервые в зависимости от высоты и сезона экспериментально уста-

новлен вклад волновых потоков горизонтального импульса в формирование высотно-сезонных структур зональной и меридиональной циркуляции, указывающий на определяющую роль диссипирующих волн при формировании меридиональной циркуляции и ее внутригодовых вариаций.

4. По разрушению длительных метеорных радиоэхо получены оценки скорости диссипации турбулентности соответственно в весенне-летний и зимний периоды  $\varepsilon \approx 4500 \text{ см}^2 \text{с}^{-3}$ ,  $15000 \text{ см}^2 \text{с}^{-3}$  в интервале масштабов 15-25 м, 6-16 с. Определена в интервале высот 80-110 км высотно-сезонная структура интенсивности нерегулярных движений как суперпозиции волновых и турбулентных движений с характерными внутрисуточными вариациями, временные масштабы которых соответствуют ВГВ, коротковолновым модам приливов с вертикальными длинами волн 9-60 км, а также долгопериодными вариациями с масштабами 1 год, 0.5 года, время максимума которых соответствует времени максимума годовых и полугодовых вариаций суточного и полусуточного прилива; установлены области устойчивой циркуляции, расположенные на высотах  $h > \sim 104 \text{ км}$  - зимой,  $h > \sim 95 \text{ км}$  - летом, где отсутствует диссипация ВГВ.

5. Выявлена в функции высоты и сезона горизонтальная мезомасштабная неоднородность преобладающих и приливных движений зональной и меридиональной циркуляции; впервые установлена высотно-сезонная структура крупномасштабных вертикальных перемещений в интервале высот 85-105 км на основе решения уравнения неразрывности и использования экспериментальных данных о высотных профилях горизонтальной дивергенции ветрового поля для каждого месяца года; определены средние за 3 года нормы вертикальных движений с нисходящими и восходящими перемещениями зимой и летом, достигающими значений  $\pm(10 \pm 2) \text{ см с}^{-1}$  на высоте  $\sim 105 \text{ км}$ ; выявлены годовые, полугодовые вариации и межгодовой тренд; установлена взаимосвязь на высотах мезосферы-нижней термосферы внутригодовых вариаций вертикальных движений, меридиональной циркуляции и температурных полей, свидетельствующая о повышении температуры в периоды нисходящих движений, и о связи смены направления вертикальных и меридиональных движений.

6. Разработано модельное описание высотно-сезонных вариаций преобладающих, приливных, нерегулярных движений, крупномасштабных вертикальных перемещений на основе установленных экспериментально в зависимости от высоты среднегодовых норм и параметров годовых и полугодовых периодичностей исследуемых динамических процессов, представленное в виде региональных моделей.

7. Установлены высотные зависимости взаимосвязи нейтрального ветра в нижней термосфере с неоднородной структурой нижней ионосферы и эффектами поглощения радиоволн в области  $\mathcal{D}$  : выявлены высотные зависимости корреляционных связей внутригодовых вариаций ионосферного параметра  $f_{min}$  , характеризующего поглощение радиоволн в области  $\mathcal{D}$  , и преобладающих зональных и меридиональных , вертикальных, нерегулярных движений, с максимумом корреляции соответственно в интервалах высот 80-92 км, 85-110 км, 80-105 км, 95-110 км; показано, что вертикальные, волновые и турбулентные движения входят в систему факторов, определяющих зимнюю аномалию поглощения радиоволн; выявлено подобие аномальных высотных профилей электронной концентрации нижней ионосферы и дивергенции ветрового поля в соответствующем интервале высот; установлен контроль внутригодовых вариаций  $(f_{oE_s})_{ME}$  и  $(f_{oE_s})_1$  ,  $(f_{oE_s})_2$  соответственно со стороны зональных преобладающих и приливных движений нижней термосферы, наиболее выраженный выше 100 км.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. А.с. 493193 СССР / Г.М. Тептин ,А.Н. Фахрутдинова // Открытия. Изобретения. - 1975. - N 12.
2. Фахрутдинова А.Н. О точности фазового метода измерения координат отражающих точек на метеорных следах и некоторых высотных зависимостях метеорных явлений // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1975. - Вып.10-11. - С.103-112.
3. Тептин Г.М., Фахрутдинова А.Н. Исследование мелкомасштабной турбулентности по радиометеорным наблюдениям // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1976. - Вып.12-13. - С.150-156.
4. Фахрутдинова А.Н. О возможностях исследований турбулентных движений по флуктуирующим радиоотражениям // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1976. - Вып.12-13. - С.231-236.
5. Сидоров В.В., Фахрутдинова А.Н., Иванушкина Т.С. Исследование турбулентных движений по флуктуирующим радиоотражениям // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. - М.: Гидрометеиздат, 1979. - С.125-129.

6. Сидоров В. В., Пупышев Ю. А., Фахрутдинова А. Н., Степанов А. М., Костылев К. К., Макаров В. А., Шувариков В. А., Нестеров В. Ю. Автоматизированный радиолокационный комплекс КГУ-М5 для метеорных исследований. Ч.1 // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1979. - Вып. 14. - С. 10-17.
7. Фахрутдинова А. Н., Степанов А. М. Статистические возможности азимутальных наблюдений за метеорными следами // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1979. - Вып. 14. - С. 25-29.
8. Фахрутдинова А. Н., Макаров В. А., Нестеров В. Ю., Шувариков В. А., Попова В. П. Результаты ветровых измерений весной 1979 г. // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1980. - Вып. 16. - С. 92-95.
9. Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н. Квазидвухсуточные периодичности изменения скорости ветра на метеорных высотах // Метеорные исследования. - М., 1981. - N 7. - С. 74-82.
10. Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н., Макаров В. А., Степанов А. М., Нестеров В. Ю., Шувариков В. А. Автоматизированный радиолокационный комплекс для исследования движений в метеорной зоне // Метеорные исследования. - М., 1981. - N 7. - С. 83-89.
11. Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н., Макаров В. А. Движения на метеорных высотах в интервале масштабов 1-7 час // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1981. - Вып. 16. - С. 56-62.
12. Пупышев Ю. А., Макаров В. А., Нестеров В. Ю., Сидоров В. В., Степанов А. М., Фахрутдинова А. Н., Шувариков В. А. Автоматизированный радиолокационный комплекс КГУ-М5 для измерения координат отражающих областей на метеорных следах // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1981. - Вып. 17. - С. 96-100.
13. Кальченко Б. В., Лизогоуб В. В., Лысенко И. А., Макаров В. А., Портнягин Ю. И., Фахрутдинова А. Н. Результаты координированных экспериментальных исследований 1980 г. (зима-весна) ветрового режима в области мезопаузы нижней термосферы над Европой // Результаты наблюдений в СССР дрейфа метеорных следов по программе средней атмосферы. Каталог данных. - М.: ВИНТИ, 1981. - 142 с.
14. Кальченко Б. В., Лизогоуб В. В., Лысенко И. А., Портнягин Ю. И., Сте-

- панов А. М., Фахрутдинова А. Н. Радионаблюдения дрейфа метеорных следов в июле-августе 1978 г. по программе ГРМПИВ // Метеорные исследования. - М., 1982. - N 7. - С. 23-27.
15. Макаров В. А., Нестеров В. Ю., Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н., Шуварики В. А. Исследование ветрового режима в метеорной зоне в период весенней перестройки 1979 г. // Метеорные исследования. - М., 1983. - N 8. - С. 16-21.
16. Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н., Макаров В. А., Нестеров В. Ю., Шуварики В. А. Исследования ветровых движений в период зимней аномалии радиометеорным методом // Метеорные исследования. - М., 1983. - N 8. - С. 12-16.
17. Кальченко Б. В., Лизогуб В. В., Лысенко И. А., Портнягин Ю. И., Степанов А. М., Фахрутдинова А. Н. Исследование режима ветра нижней термосферы по результатам координированных радиометеорных наблюдений в зимне-весенний период 1981 г. // Результаты наблюдений в СССР дрейфа метеорных следов по программе средней атмосферы. Каталог данных. - М.: ВИНТИ, 1983. - 140 с.
18. Макаров В. А., Нестеров В. Ю., Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н., Шуварики В. А. Некоторые результаты измерений ветра на высотах 80-100 км зимой 1979 г. // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. - М.: Гидрометеиздат, 1983. - С. 88-90.
19. Макаров В. А., Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н. Исследование движений в широком интервале временных масштабов // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. - М.: Гидрометеиздат, 1983. - С. 91-93.
20. Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н., Шуварики В. А. О возможности использования метеоров потока для выделения короткопериодных волновых движений // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. - 1983. - Т. 19, N 11. - С. 122-123.
21. Сидоров В. В., Фахрутдинова А. Н. Радиометеорные исследования движений в верхней атмосфере, выполненные в Проблемной радиоастрономической лаборатории Казанского университета в период 1964-1981 гг. // Метеорные исследования. - М., 1984. - N 9. - С. 56-59.
22. Кальченко Б. В., Лизогуб В. В., Степанов А. М., Фахрутдинова А. Н., Лысенко И. А., Портнягин Ю. И. Режим ветра на высотах 90-100 км по данным координированных радиометеорных наблюдений в Обнинске, Казани и Харькове в 1982 г. // Результаты наблюде-

- ний в СССР дрейфа метеорных следов по программе средней атмосферы. Каталог данных. - М.: ВИНТИ, 1984. - 162 с.
23. Фахрутдинова А.Н., Макаров В.А. Исследование нерегулярных движений в нижней термосфере в подготовительный период МАП по наблюдениям в Казани // Метеорные исследования. - М., 1985. - N 10. - С.20-22.
  24. Сидоров В.В., Фахрутдинова А.Н. Основные закономерности преобладающих и приливных движений по результатам радиометеорных наблюдений в Казани // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. - М.: Гидрометеиздат, 1985. - С.47-51.
  25. Ганин В.А., Макаров В.А., Костылев К.К., Сидоров В.В., Степанов А.М., Фахрутдинова А.Н. Радиолокационные наблюдения метеорного дождя Драконид в Казани в октябре 1985 г. // Астрономический циркуляр. - 1986. - N 1452. - С.5-6.
  26. Сидоров В.В., Фахрутдинова А.Н. Исследование возмущений в нижней термосфере радиометеорным методом // Метеорные исследования. - М., 1986. - N 12. - С.32-38.
  27. Sidorov V.V., Fahrutdinova A.N., Ganin V.A. Characteristics of wind shear, atmospheric gravity waves and turbulence as determined by meteor radar measurements // Acta Geod. Geoph. Mont. Hung. - 1987. - Vol.22, N 1-2. - P.283-291.
  28. Фахрутдинова А.Н., Степанов А.М., Попова В.П. Сезонные и межгодовые вариации циркуляции в нижней термосфере по радиометеорным измерениям в Казани // Метеорные исследования. - М., 1987. - N 13. - С.26-29.
  29. Fahrutdinova A.N., Stepanov A.M., Perevedentsev Yu.P. On the interconnection of dynamic processes in the lower thermosphere with meteorological phenomena in the tropostratosphere // Middle Atmosphere Program. Handbook for MAP. - 1987. - Vol. 25. - P.70-73.
  30. Sidorov V. V., Fahrutdinova A.N., Ganin V.A. Main results of atmospheric fine structure parameter observation in the lower thermosphere // Middle Atmosphere Program. Handbook for MAP. - 1987. - Vol. 25. - P.138-142.
  31. Sidorov V.V., Fahrutdinova A.N., Makarov V.A. Lower thermosphere wind regime according to radiometeor measurements in Kazan // Middle Atmosphere Program. Handbook for MAP. - 1987. - Vol. 25. - P.189-193.

2. Фахрутдинова А.Н. Аппаратура для геофизических исследований нижней термосферы Казанского университета // Глобальная система метеорных наблюдений. Информационно-методические материалы. - М.: ВИНТИ, 1987. - С.31-33.
3. Олейников А.Н., Фахрутдинова А.Н. Пробные одновременные измерения профиля метеорного ветра в Казани и Харькове // Глобальная система метеорных наблюдений. Информационно-методические материалы. - М.: ВИНТИ, 1987. - С.36-39.
4. Степанов А.М., Фахрутдинова А.Н. Влияние магнитного поля на диффузию метеорной ионизации // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. - М.: Гидрометеиздат, 1988. - С.156-158.
5. Ганин В.А., Макаров В.А., Сидоров В.В., Фахрутдинова А.Н. Пространственные и временные вариации высотных профилей ветра в метеорной зоне // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. - М.: Гидрометеиздат, 1988. - С.43-46.
6. Фахрутдинова А.Н., Каримов А.К. Вертикальная и горизонтальная неоднородность поля ветра в нижней термосфере // Глобальная система метеорных наблюдений. Результаты исследований. - М.: ВИНТИ, 1988. - С.39-43.
7. Фахрутдинова А.Н., Макаров В.А., Ишмуратов Р.А., Умяров А.А. Высотные и сезонные закономерности преобладающих и приливных движений по измерениям в Казани // Глобальная система метеорных наблюдений. Информационно-методические материалы. - М.: ВИНТИ, 1988. - С.32-38.
8. Gurjanov V.V., Perevedentsev Yu.P., Sidorov V.V., Stepanov A.M., Fahrutdinova A.N., Shantalinski K.M. Climatic changeability of dynamic processes of middle atmosphere // Second GLOBMET Symposium. Abstracts. - M.: VINITI, 1988. - P.2.
9. Portnyagin Yu.I., Lysenko I.A., Kascheev B.L., Lizogub V.V., Fahrutdinova A.N., Makarov V.A. Zonal wind velocity variations of synoptic scales in the lower thermosphere from meteor radar measurements in the USSR // Second GLOBMET Symposium. Abstracts. - M.: VINITI, 1988. - P.2.
10. Portnyagin Yu.I., Lysenko I.A., Kascheev B.L., Lizogub V.V., Sidorov V.V., Fahrutdinova A.N. Seasonal variations of tidal parameters from meteor radar measurements in the USSR // Second GLOBMET Symposium. Abstracts. - M.: VINITI, 1988. - P.5.

41. Gainutdinova R.D., Fahrutdinova A.N., Karimov A.K. Some results of the investigations of vertical motions in meteor zone // Second GLOBMET Symposium. Abstracts. - M.: VINITI, 1988. - P.3-4.
42. Портнягин Ю.И., Лысенко И.А., Кашеев Б.Л., Лизогуб В.В., Сидоров В.В., Фахрутдинова А.Н. Сезонные вариации преобладающих ветров и параметров приливов по данным многолетних радиометеорных наблюдений в СССР: Тез. 3 семинара КАПГ по метеорологическим эффектам в ионосфере. - София: ГИ АН НРБ, 1988. - С.98.
43. Гайнутдинова Р.Д., Каримов А.К., Фахрутдинова А.Н. О методе оценок вертикальных скоростей в метеорной зоне с учетом высотной зависимости скорости ветра // Метеорные исследования. - М., 1988. - N 15. - С.18-25.
44. Фахрутдинова А.Н. Нерегулярные движения в нижней термосфере по радиометеорным измерениям // Геомагнетизм и аэрономия. - 1989. - Т.29, N 5. - С.871-874.
45. Fahrutdinova A.N., Khutorova O.G. Fluxes of energy, heat, momentum and mass created by internal gravity waves on the terrestrial stratosphere // Middle atmosphere study international Symposium. Abstracts. - M.: VINITI, 1989. - P.48.
46. Sidorov V.V., Fahrutdinova A.N., Karimov A.K., Karimov K.A., Gainutdinova R.D. Vertical motions in the lower thermosphere based on the results of radiometeor measurements in Kazan and Frunze in 1986-1988 // Middle atmosphere study international Symposium. Abstracts. - M.: VINITI, 1989. - P.39-40.
47. Ganin V.A., Makarov V.A., Ishmuratov R.A., Umjarov A.A., Fahrutdinova A.N. Altitudinal, interannual, seasonal variation of prevailing and tidal motion in the lower thermosphere from radiometeor measurements in Kazan // Middle atmosphere study international Symposium. Abstracts. - M.: VINITI, 1989. - P.43.
48. Фахрутдинова А.Н. Закономерности преобладающих и приливных движений в нижней термосфере // Материалы итоговой конференции Казанского университета за 1987г. / Сер.Естественные и точные науки. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1989. - С.62-65.
49. Фахрутдинова А.Н. Динамика нижней термосферы средних широт по результатам радиометеорных измерений в Казани // Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во Казанск.